

(102) 高強度コンクリートを用いたPC道路橋(菅野側道橋)の性能試験

オリエンタル建設(株) 技術研究所 正会員 ○阿部 浩幸
 オリエンタル建設(株) 大阪支店 宮脇 泰一郎
 建設省中国地方建設局岡山国道工事事務所 黒川 英知
 建設省土木研究所材料施工部コンクリート研究室 渡辺 博志

1. はじめに

近年、高性能AE減水剤の開発およびコンクリート製造技術の進歩により、実験室レベルでは圧縮強度100N/mm²を越える高強度も容易に得られるようになってきた。このような高強度コンクリートを実構造物に適用することにより部材断面の縮小化が可能になり、構造物の死荷重の減少によるスパンの長大化、あるいはプレキャスト部材についていえば部材の軽量化による運搬効率の向上、施工の省力化、下部構造物への負担の軽減などが期待される。

このような背景を受けて、建設省土木研究所と(社)プレストレス・コンクリート建設業協会が共同研究を実施して、設計基準強度80N/mm²までを対象とした「高強度コンクリートを用いたプレストレストコンクリート道路橋の設計施工指針(案)」¹⁾としてとりまとめられた。また、その成果は平成8年12月に改訂された道路橋示方書・コンクリート橋編²⁾に反映されるに至った。

当該橋梁は、この指針(案)および改訂された道路橋示方書・同解説 IIIコンクリート橋編に基づいて設計された設計強度80N/mm²のコンクリートの道路橋である。本報告は、この橋梁と同仕様で製作された試験桁の破壊試験を行い、設計の妥当性および安全性について報告するものである。

2. 工事概要

工事名 : 菅野側道橋
 発注者 : 建設省中国地建岡山国道
 工事事務所
 橋梁形式 : プレテンション方式PC
 単純床版橋
 橋長 : 14.500m
 桁長 : 14.440m
 支間 : 13.940m
 有効幅員 : 4.000m
 角度 : 左70°00'00"
 荷重 : A活荷重
 使用材料 :

コンクリート $f'_{ck} = 80 \text{ N/mm}^2$

PC鋼材 縦締め SWPR7B T15.2

横締め SBPR930/1080 $\phi 23$

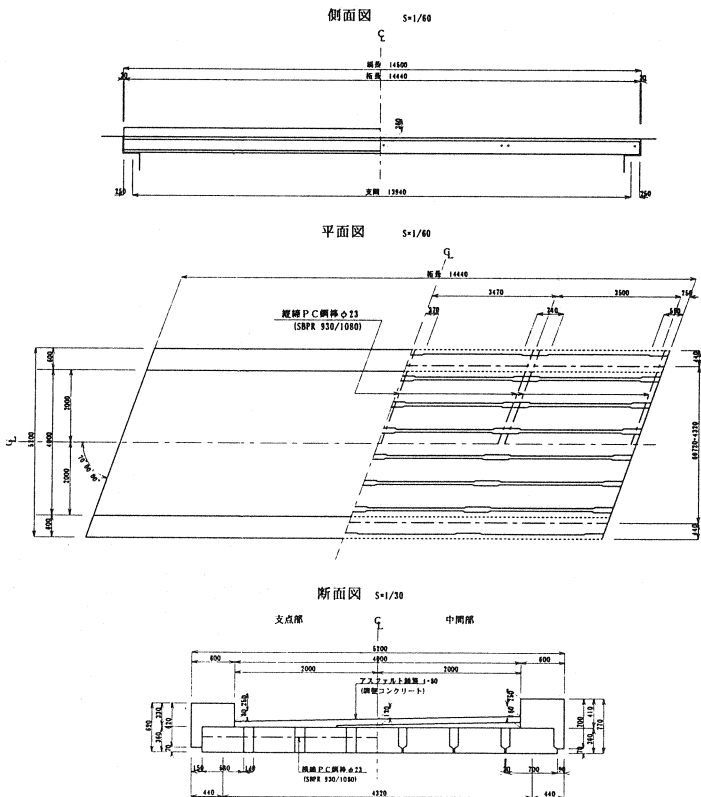


図-1 橋梁一般図

同じ設計条件において、これまでと同じコンクリート ($f'_{ck}=50\text{N/mm}^2$) を用いた場合、桁高が $H=50\text{cm}$ の主桁断面であるのに対して、高強度コンクリート ($f'_{ck}=80\text{N/mm}^2$) を主桁に採用することにより桁高が $H=36\text{cm}$ の断面へと縮小が可能になり、死荷重の減少・下部構造物への負担軽減が図れた設計となった。実橋はすでに完成し、供用開始している。

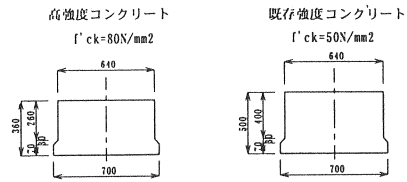


図-2 コンクリート強度による主桁形状比較

コンクリートの示方配合表を表-1に示す。水セメント比を $W/C=27\%$ と押さえ、高性能AE減水剤を混和することにより、高強度でワーカビリティのよい配合とした。

表-1 示方配合表

設計基準 強度 f'_{ck} (N/mm^2)	粗骨材の 最大寸法 G_{max} (mm)	スラング70- の範囲 (cm)	空気量の 範囲 (%)	水セメント比 W/C (%)	縮水率 s/e (%)	原 位 量 (kg/m ³)				
						水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤 P
80	20	45±5	2±1	27	46	150	556	775	916	8.9

3. 実験概要

3.1 載荷方法

試験桁は、実橋の主桁と同時期に同仕様の桁を製作したものを用いた。また、実験載荷スパンとしては、実構造物の支間と同じ距離とし、載荷スパン120cmとする2点載荷曲げ試験を行った。図-3に試験概要図を示す。加力は油圧ジャッキにて行い、載荷はりを介して試験桁へ載荷するものとした。その制御方法としては、終局時荷重までは荷重制御にて行い、その後変形量が大いことより変位制御にて行った。

載荷は、設計時荷重・曲げひび割れ発生荷重・終局時荷重および破壊荷重それぞれにおける試験桁の性状などを確認するため、以下に示すステップに沿って行った。ここに示す設計時荷重及び終局時荷重とは、実橋設計条件の基に主桁自重、間詰めコンクリート荷重、橋面荷重及び活荷重によって実橋の主桁1本に作用する設計時及び終局時荷重作用最大曲げモーメントと同じモーメントを試験条件において試験桁に発生させる(試験桁自重及び載荷治具荷重によるモーメントを除く)荷重とした。また、それぞれのステップにおいて、桁の性状として確認した事項を列挙する。

STEP1 0tf → @1tf → 設計時荷重 (6.995tf) → @2tf → 0tf

- ・ 除荷時に試験桁のたわみが復元するかどうか
- ・ 設計荷重において、試験桁に有害なひび割れの発生が無いかどうか

STEP2 0tf → 設計時荷重 → @0.5tf → ひび割れ発生荷重 → @2tf → 0tf

- ・ ひび割れ発生荷重の確認

STEP3 0ton → @2ton (0.5ton) → ひび割れ再開荷重 → @1ton → 終局時荷重 (15.868tf)

→ 変位制御 → 破壊

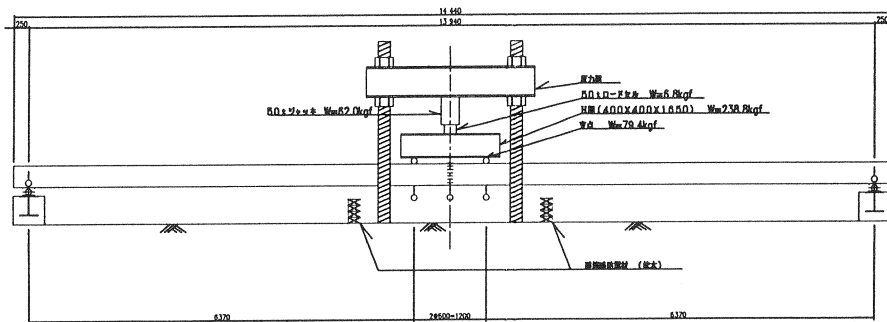


図-3 試験概要図

- ・ひび割れ再開荷重の確認
- ・ひび割れ進捗状況の観察、描写
(安全を考慮して、ひび割れの観察は途中まで(26.4tf)とした。)
- ・終局時荷重まで試験桁の耐力があるかどうか
- ・破壊時荷重及び破壊状況

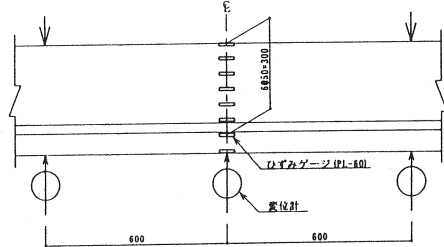


図-4 変位およびひずみ測定位置図

3. 2 測定項目及び測定位置

測定項目として、①載荷荷重は50tロードセルを油圧ジャッキと載荷梁の間に配置し測定(図-3参照)、②各荷重段階における試験桁変位を中央及び載荷点位置に取り付けた変位計により測定(図-4参照)、③各荷重段階における試験桁高方向のひずみ分布をスパン中央断面に貼付したコンクリート表面ゲージにより測定(図-4参照)、④ひび割れ発生荷重の確認及び試験桁側面に10×10cmのメッシュを描き各荷重段階におけるひび割れ進捗状況を追跡・描写、以上の項目とした。

表-2 試験桁のコンクリート試験結果

製作月日	スラブフロー(cm)	空気量(%)	単位 (N/mm ²)			
			材令 132 日			
			上:圧縮強度	下:ヤング係数 × 10 ⁴	1	2
1月16日	42 × 45	2.0	84.0 4.10	84.7 4.21	92.2 4.17	87.0 4.16

表-3 製作桁のコンクリート一覧表

製作月日	スラブフロー(cm)	空気量(%)	単位 (N/mm ²)											
			材令 1 日			材令 7 日			材令 28 日					
			上:圧縮強度	下:ヤング係数 × 10 ⁴	3平均	上:圧縮強度	下:ヤング係数 × 10 ⁴	3平均	上:圧縮強度	下:ヤング係数 × 10 ⁴	3平均			
1月6日	48 × 48	2.1	68.0 3.58	73.8 3.66	71.0 3.69	70.9 3.64	79.6 3.88	83.5 3.91	77.2 3.89	80.1 3.89	104.8 4.44	99.8 4.45	105.8 4.46	103.5 4.46
1月7日	48.5 × 48	1.6	78.1 3.84	75.0 3.57	72.1 3.63	74.4 3.68	77.2 3.92	79.8 4.01	84.2 3.92	80.4 3.95	93.7 4.55	98.7 4.45	101.2 4.45	97.9 4.48
1月8日	48.5 × 47	1.8	77.5 4.02	75.1 4.18	79.5 4.15	77.4 4.12	85.7 4.27	86.6 4.23	82.8 4.31	85.0 4.27	106.6 4.52	100.8 4.44	100.6 4.60	102.7 4.52
1月9日	46 × 47	1.8	68.6 3.92	75.8 3.87	87.6 3.95	70.7 3.91	80.9 3.92	81.1 4.06	88.1 3.99	83.4 3.99	98.2 4.33	99.9 4.16	99.0 4.14	99.0 4.21
1月12日	44 × 47	1.9	70.4 3.63	76.3 3.79	70.8 3.89	72.5 3.84	83.4 3.92	85.7 4.01	85.1 3.90	84.7 3.94	95.1 4.52	100.3 4.42	102.2 4.42	95.3 4.45
1月13日	41 × 43	2.0	70.4 3.80	76.3 3.81	70.8 3.93	72.5 3.85	83.4 3.95	85.7 3.93	85.1 3.88	84.7 3.93	95.1 4.60	100.3 4.45	102.2 4.37	95.3 4.47
1月14日	41 × 41	2.3	68.8 3.55	64.2 3.60	70.8 3.61	67.9 3.58	77.2 3.75	75.4 3.75	80.9 3.64	77.8 3.71	95.5 4.13	91.3 4.10	93.2 4.23	93.3 4.15
既設試験桁			76.0 3.89	81.4 3.86	83.0 3.86	80.1 3.87	83.7 3.87	87.1 3.84	84.0 3.88	84.9 3.86	91.7 4.20	96.0 4.13	93.2 4.23	93.6 4.19
1月16日	42 × 45	2.0	70.7 3.69	71.3 3.71	68.1 3.69	70.0 3.70	80.3 3.95	84.4 3.99	85.1 3.95	83.3 3.95	95.4 4.45	98.4 4.40	98.9 4.46	97.8 4.44
1月19日	45 × 46	1.6												

4. 実験結果及び考察

4. 1 コンクリート材料試験

試験桁の載荷試験にともない、コンクリート圧縮強度及びヤング係数の測定を行い、その結果を表-2に示す。また、実橋の各主桁に対する標準材令における試験結果を表-3に示す。この表より、打設ごとのスラブフローおよび圧縮強度・ヤング係数に大きな変動はなく、工場製作における高強度コンクリートの品質管理が十分に可能であると言える。コンクリート強度とヤング係数の関係を図-5に示す。なお、図中には道路橋示方書に規定されているコンクリートのヤング係数を実線で示している。道路橋示方書規定の値は、今回のコンクリート試験結果より若干低い傾向にあることがわかる。この理由として、道路橋示方書は高強度コンクリートのばらつきを考慮し安全側の値に設定しているためと考えられる。

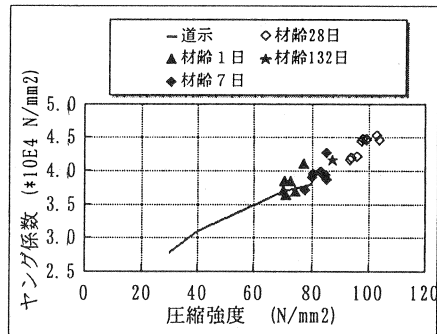


図-5 コンクリート強度とヤング係数

4. 2 試験桁載荷試験

(1) 現設計手法について

① 荷重と桁性状

試験桁の載荷試験結果を基に、現行の道路橋示方書

表-4 各設計荷重時試験桁性状

荷重状態	設計計算値	試験桁性状
設計時荷重	6.999tf	ひび割れ発生の確認されず健全
ひび割れ発生荷重	8.142tf	除荷後たわみは復元 微細なものであり荷重除荷によりたわみはほぼ復元
終局時荷重	15.868tf	数本のひび割れが発生するものの健全
破壊荷重	22.825tf	31.640tfにて破壊

に沿って行われた実橋の設計計算の妥当性を確認する。

設計計算に用いた物理定数を表-5に示す。設計時相当の荷重が載荷した状態において、試験桁にはひび割れの発生はなく、健全であることが確認された。実験結果より得られたひび割れ発生荷重は計算値以上を示し、ひび割れは微細なものであり荷重除荷後たわみはほぼ初期状態に復元した。また、終局時相当の荷重が載荷した状態において、試験桁は破壊することなく十分な耐力を有し、外見上も数本のひび割れが中央付近に発生するだけで健全なものであった(図-7参照)。計算より得られる試験桁の破壊荷重は $P=22.825\text{tf}$ であり、実験結果は計算値を上回り、終局時荷重の1.39倍の荷重 $P=31.64\text{tf}$ にて破壊し、道路橋示方書規定の破壊時コンクリートひずみ $\epsilon_c=2500\mu$ 時の荷重においても終局時荷重の1.29倍の荷重 $P=29.47\text{tf}$ と十分な安全率を示した。しかし、設計計算において最終段階時までのクリープ・乾燥収縮を想定しているが、載荷試験は材令132日の時点で行っていること、および、横桁荷重および橋面荷重などの荷重が載荷されていないことより、試験桁のクリープ・乾燥収縮によるプレストレス変化量は設計計算のものとは異なる。それぞれの数値を表-5に示す。これらを考慮し計算した結果は、ひび割れ発生荷重は $P=8.258\text{tf}$ 、破壊荷重は $P=23.70\text{tf}$ と設計計算値より多少大きな値を示すが、実験結果はそれぞれの値に対しても十分に上回る値を示した。以上のことより、現行の設計手法を用いた場合、計算値は常に実験結果を下回り、設計時荷重及び終局時荷重に対して十分な安全性が確保されており現設計手法の妥当性が確認された。

②たわみ

試験桁のたわみを計算し、実験との比較をする。実験結果と解析値の比較として、載荷荷重と中央断面位置における変位との関係を表したものを図-6に示すまた、代表的な荷重段階でのひび割れ発生状況を図-7に示す。

桁には橋軸方向鉄筋としてD10を $N=3$ 本配置しているが、これらはいずれも組立鉄筋として配置されているものであるため、計算上はこれを無視することとした。また、ひび割れ発生後の剛性低下として、コンクリート標準示方書規定の有効曲げ剛性を全長にわたって一定にする方法により算出した結果を用いた。図-6より、ひび割れ発生荷重までは、計算値は

表-5 各解析に用いた物理定数

項目	記号	単位	設計計算物理定数	実際の物理定数	
コンクリート	設計基準強度	f_{ck}	N/mm^2	80.0	87.0
	ヤング係数	E_c	N/mm^2	$3.80\text{E}+04$	$4.329\text{E}+04$
	クリープ係数	ψ		3.00 (1.56)	1.56
	乾燥収縮係数	ϵ_s	μ	200 (150)	150
PC鋼材	ヤング係数	E_p	N/mm^2	$2.00\text{E}+05$	$1.978\text{E}+05$
	リラクスン率(プレ導入期)	r	%	6.00	2.50
	リラクスン率(プレ導入後)	r	%	5.00	1.50

注:()内数値は材令132日の値を示す

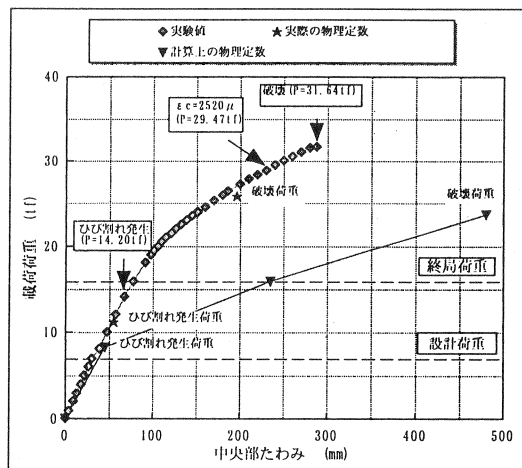


図-6 荷重-たわみの実験値と計算値の比較値

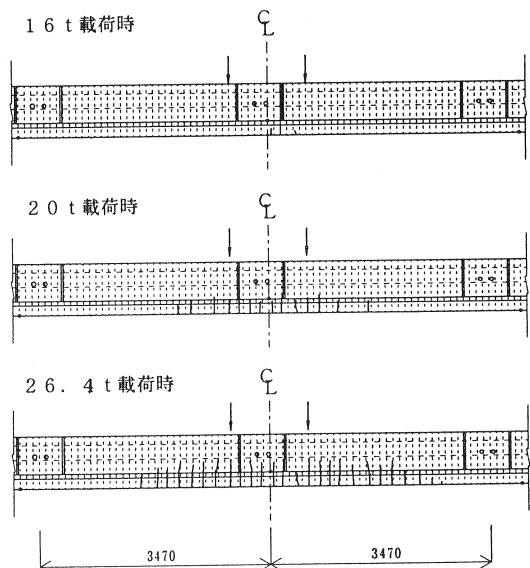


図-7 各荷重段階でのひび割れ図

実験値とほぼ一致しており、通常用いる荷重範囲(設計荷重以下)において計算によりたわみを想定することが可能といえる。一方、ひび割れ発生以後において、実験値との差が大きくなっているが、これは断面剛性の考え方においてコンクリートの引張部分を無視した断面で算出しているためと考えられる。また、実際のひび割れは、設計ひび割れ荷重を大きく上回り、ひび割れ荷重発生後すぐに多くのひび割れが発生するのではなく、載荷荷重が約20t近くから徐々に増加し、最終段階においても中央から3mの区間においてのみ発生しただけであった。これらのため、計算値とは大きく異なったものと考えられる。

(2) 実際の物理定数を用いた計算について

① ひび割れ発生および破壊荷重

実際のコンクリートの材料試験結果及びPC鋼材の試験成績の値を用いて、計算方法として道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋編及びV耐震設計編³⁾に準じて計算した。この場合、コンクリートの応力度-ひずみ曲線モデルとして同書記載の「タイプIの地震動」のものを用いコンクリートの引張強度を考慮するものとし(引張強度算出式は、コンクリート標準示方書⁴⁾に準じた)、コンクリートの強度として材料試験結果の値を用いるものとした。解析手法に用いた物理定数を表-4に示す。主桁にせん断補強が配置されているものの、鉄筋比は $\rho_s=0.26\%$ 程度と小さいことよりその拘束効果を無視するものとした。また、部材の破壊曲げモーメントを計算する際、道路橋示方書に記述されている応力分布を簡略化するのではなく、応力度ひずみ分布関係を直接用いて積分計算する方法を採用した。その結果を図-6にプロットした。

計算結果は、ひび割れ発生荷重および破壊荷重それぞれ $P=11.19\text{tf}$ 、 $P=25.80\text{tf}$ であり、計算値に対する実験値の割合が1.30および1.14と現設計計算値より近い値となった。この理由として、曲げ引張応力度が設計計算に用いたものより大きい値を使用していることおよび破壊抵抗曲げモーメント算出時においてもコンクリートの引張強度を考慮する手法がより実際に近いものと考えられる。ただし、まだ実験値との差があり、その原因として考えられることは、材料試験結果と試験桁とでは強度に違いがある

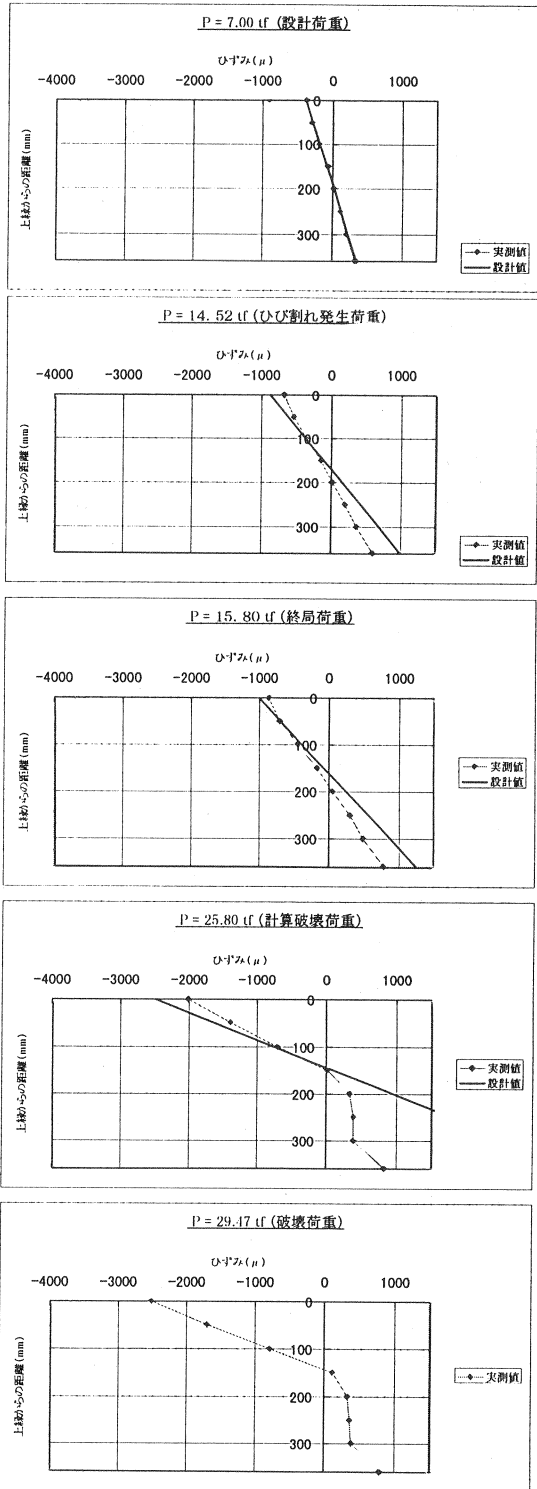


図-8 各荷重における中央断面ひずみ分布

と思われること、クリープの進行度を実物大桁により現在計測を行っているがこの途中結果から道路橋示方書の進行度より遅い結果が得られていることより、実際はクリープによるプレストレスの低下は少ないものと思われる。

②ひずみ分布

図-8に各荷重段階における試験桁中央断面でのひずみ分布の実験値及び計算値(実際の物理定数を用いた計算結果)を示す。これより、設計時荷重(7.0lf)の状態においては、ひずみ分布は高い直線性を示し、計算値とほぼ一致していることが言える。このことは、今回用いた高強度コンクリートにおいても平面保持が成り立ち、計算方法の妥当性を示すものと言える。ひび割れ発生後の状態において、実験値は荷重増加に比例して中立軸が上方へ移行していることがわかり、計算値もその傾向は同じと言える。荷重が増加するに従い、計算値と実験値の差は徐々に大きなものとなっている。計算値は平面保持の仮定によって算出されていることより直線で示しているが、実験値は中立軸上縁(圧縮領域)においてはひずみは直線性を示し、それより下縁(引張領域)においては直線性が失われている。これは、コンクリート引張領域においてひび割れが発生していることにより連続性が失われたためであり、引張力をコンクリートではなくP C鋼材が負担していると言える。言い換えればP C鋼材とコンクリートの付着が十分に確保されていると言える。このことは、ひび割れ状況がひび割れが一点に集中するのではなく、ある一定の間隔をもって発生していることからわかる。

以上のことより、高強度コンクリートにおいても平面保持が成り立ち、現計算手法によりひび割れ発生以下の荷重におけるひずみ状態を検証することができると言える。また、ひび割れ発生後において引張力は引張側に配置された鋼材により負担し、圧縮力はコンクリートによって負担されるという現設計手法の考え方は妥当なものであると言える。

5. まとめ

本実験は、高強度コンクリート($f'_{ck}=80\text{N/mm}^2$)を用いた道路橋の設計の妥当性および安全性を確認する目的のため、実橋と同様の試験桁を用いて載荷試験を行った。今回の実験結果より、以下に示す結果が得られた。

- (1) 実橋の設計計算は、十分妥当なものであり、設計荷重及び終局荷重作用時における主桁性状の安全性が確認された。
- (2) 高強度コンクリートの設計においても、道路橋示方書に規定の計算手法が適用できることが確認された。
- (3) 高強度コンクリートにおいても、P C鋼材との付着が十分にあることが確認された。
- (4) W/C=27%程度の配合であっても、十分品質の変動の少ないP C部材が製造可能であるが確認された。

参考文献

- 1) 高強度コンクリート部材の設計法に関する共同研究報告書-高強度コンクリートを用いたプレストレストコンクリート道路橋の設計指針(案)- 建設省土木研究所材料施工部コンクリート研究室(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会、平成7年11月
- 2) 道路橋示方書・同解説 I 共通編Ⅲコンクリート橋編 社団法人日本道路協会、平成8年12月
- 3) 道路橋示方書・同解説 V耐震設計編 社団法人日本道路協会、平成8年12月
- 4) コンクリート標準示方書 設計編 土木学会 平成8年度制定